

波動場で渦励振動している直円柱に作用する波力の増加現象について

林建二郎*・檜垣 太**・藤間功司***・重村利幸****

1. 緒 言

波動場における柱状弾性構造物（例えば石油掘削用ライザー管）の設計においては、作用揚力に対する構造物の応答振動（渦励振動）問題を十分に検討する必要がある。渦励振動量の推定には、適用された振動方程式中の減衰定数および強制外力項の的確な評価が不可欠である。その構造物が振動しない場合（固定状態）の作用揚力の推定は、波動場や振動流中に固定設置された円柱に作用する波力に関する研究成果により可能である。しかし、渦励振動している構造物に作用する波力は、振動する構造物と流れとの相互作用現象が生じる結果、構造物が振動しない場合より大きくなっているようである（波力の増加現象）。従って、より精度高い渦励振動量の評価を行うには、渦励振動している構造物に作用する波力の特性を十分に把握することが必要である。

一様定常流中における渦励振動円柱に作用する流体力の増加現象に関しては多くの研究成果が得られているが（Blevins, 1977）、波動場や振動流場で渦励振動している円柱に作用する流体力の増加現象については、研究例も少なくまだ十分に把握されていないようである。

Sarpkaya・Rajabi (1979) は、振動流中で渦励振動している円柱に作用する揚力の増加率 (M_Y = 渦励振動円柱の作用揚力/固定円柱の作用揚力) は、 KC = 約 50 の場合で約 2.7 となる結果を報告している。林ら (1993) は、増加率 M_Y は KC 数と周波数比 f_a/f_{nw} (f_a : 振動流の周波数, f_{nw} : 円柱の静水中における固有振動数) で規定されていることを報告している。

Isaacson・Mauil (1981), Zedan・Rajabji (1981), Angrilli・Cossalter (1982) らによって、波動場に鉛直に設置された円柱（直円柱）の渦励振動時に生じる作用揚力の増加率 M_Y が評価されている。用いられた増加率の評価法の細部については、検討を要する点も多く認められるが M_Y の評価値として以下の成果が報告されている。

(1) 周波数比 $f_w/f_{nw}=1/2$, KC 数 = 10~12 の場合の増加率 M_Y は 1.6~3.9 の範囲である。 f_w は作用波周波数である。 KC 数は静水表面位置における KC 数である。

(2) $M_Y=1.6 \cdots f_w/f_{nw}=1/3$, KC 数 = 17.8 の場合

(3) $M_Y=1.9 \cdots f_w/f_{nw}=1.4$, KC 数 = 35.9 の場合

林ら (1986, 1990a) は、波動場における増加率 M_Y も振動流の場合と同様に、 KC 数と周波数比 f_w/f_{nw} で規定されている結果を報告している。

本研究は、波動場で渦励振動している柱状弾性構造物に作用する波力特性を明らかにすることを目的として、規則波中で渦励振動している直円柱に作用する波力の直接計測を試み、同円柱固定時の計測波力との比較・検討（増加率）を行ったものである。

2. 実験装置及び方法

実験は、長さ 40 m, 幅 0.8 m, 高さ 1 m の吸収式造波装置付き 2 次元造波水槽を用いて行った。図-1 に用いた試験円柱の概略を示す。試験円柱には、外径 $D=3$ cm, 長さ 104.6 cm のアクリルパイプを使用した。試験円柱の上端は、波の進行方向と直角な両方向に引張りバネと糸を用いて弾性的に支持され、下端は、長さ 20 cm, 幅 5 cm, 厚さ 0.2 cm の支持板（真鍮製）に接続されている。支持板の水路方向両端はピボットのり水槽床部に置かれ

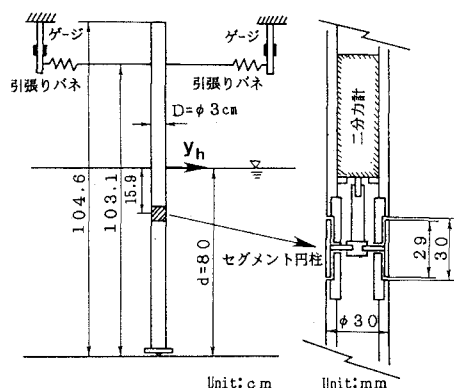


図-1 試験円柱の概略

* 正会員 Ph. D. 防衛大学校土木工学教室 助教授

** 学生会員 防衛大学校大学院 理工学研究所

*** 正会員 工博 防衛大学校土木工学教室 講師

**** 正会員 Dr. Eng. 防衛大学校土木工学教室 教授

表-1 実験ケース ($d=80\text{ cm}$, $k_a=2\pi d/L$ (d :水深, L :波長))

	CASE	H (cm)	f_w/f_{nw}	k_a	CKC	CR_e	β	
振 動 円 柱	V2	5.6~19.4	1/2	2.41	6.0~20.6	3900~13500	655	$f_{na}=1.79\text{ Hz}$ $f_{nw}=1.69\text{ Hz}$
	V3	5.5~24.3	1/3	1.20	6.9~30.5	2900~13000	426	$h_{na}=0.0035$ $h_{nw}=0.014$
	V4	3.0~20.2	1/4	0.90	4.4~29.7	1500~10100	342	$m_e/(\rho \cdot D^2)=8.34$
	V5	5.3~16.7	1/5	0.69	9.3~29.4	2600~8000	274	$2m_e(2\pi \cdot h_{na})/(\rho \cdot D^2)=1.47$
	V6	2.5~19.7	1/6	0.56	5.2~40.7	1200~9300	228	

ているため、試験円柱は水路方向と直角な方向(揚力方向)にのみ倒立(ロッキング)振動する。それぞれの引張バネの他端は糸を用いてステンレス製の板バネで支持されている。静水面位置における試験円柱の振動変位量 y_h に比例する引張バネの伸張力を測定するために板バネの表裏には歪ゲージが貼られている。

試験円柱内に組み込まれた小型二分力計(三計エンジニアリング製)を用いて、静水面下 15.9 cm の位置にあるセグメント円柱 ($D=3\text{ cm}$, 長さ=2.9 cm) の単位長さなりに作用する波の進行方向(X 方向)波力 ΔF_x とその直角方向(Y 方向)波力(揚力) ΔF_y を計測した。実験に先立ち減衰自由振動実験を行い、試験円柱の空中および水中における固有振動数 f_{na}, f_{nw} と減衰定数 h_{na}, h_{nw} を求めた。

本実験で行った実験条件を表-1に示す。渦励振動量の支配パラメータ(林ら, 1986)である Mass ratio 値 ($m_e/(\rho D^2)$, m_e :試験円柱の換算単位長質量(水中付加質量も含む), ρ :水の密度)と Reduced damping 値 (k_s 値 $=2m_e(2\pi \cdot h_{na})/(\rho D^2)$) は、それぞれ 8.34 と 1.47 である。実験は静水深 $d=80\text{ cm}$ を有する規則波を用い、作用揚力の 2, 3, 4, 5, 6 次の周波数成分に対して円柱が共振している場合 ($f_w/f_{nw}=1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6$, f_w :作用波周波数)で行った(CASE V2~V6)。静水面位置における KC 数(CKC 数)の範囲は 5~40 である。 β 値 ($=CR_e/CKC$, CR_e :静水面の位置における R_e 数)の範囲は 230~660 である。また、比較のために同試験円柱を振動しないように固定した場合のセグメント円柱に作用する波力 $\Delta F_x, \Delta F_y$ を、CASE V2~V6 で使用した波と同様な作用波のもとで測定した。

水位変動 η の測定にはサーボ式波高計を用いた。水位変動出力信号は、円柱振動変位 (y_h) および波力 ($\Delta F_x, \Delta F_y$) の出力信号と共に、サンプリング周波数 50 Hz で AD 変換した。サンプリング個数は 2048 または 4096 とした。

3. 実験結果および考察

3.1 自由減衰振動時の作用流体力

空中および静水中における試験円柱の自由減衰振動変

位 y_h と二分力計で検出された $\Delta F_x, \Delta F_y$ の時間記録例を図-2(a), (b)にそれぞれ示す。対数減衰法を用いて振動変位 y_h の各半振幅値 Y_h に対する試験円柱の減衰定数を算定した。空中での減衰定数 h_{na} は Y_h の変化に対してほぼ一定 ($h_{na}=0.0035$, 表-1に記載)であった。静水中での減衰定数 h_{nw} は、 $Y_h/D < 0.3$ ではほぼ一定 ($h_{nw}=0.014$)であったが、 $Y_h/D > 0.3$ では Y_h/D の増加とともに大きくなった。

図-2(a), (b)より、 ΔF_y と y_h の減衰時間変化はほぼ同期していることが認められる。減衰定数 h が小さい場合、減衰振動する円柱の振動変位 (y_h) および振動加速度 (d^2y_h/dt^2 , t :時間)は、(1)式、(2)式でそれぞれ近似される。式中、 p は円固有振動数 ($p=2\pi \cdot f_n$, f_n :固有振動数)である。 y_{h0} は y_h の初期変位である。

$$y_h = e^{-pt} \cdot y_{h0} \cdot \cos(p \cdot t) \dots \dots \dots (1)$$

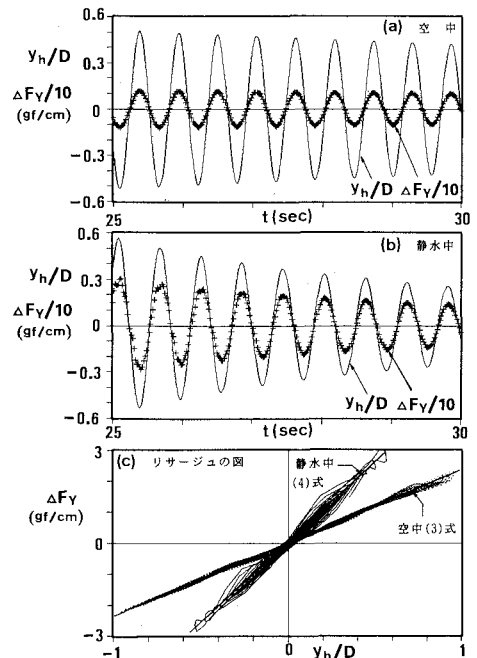


図-2 自由振動減衰時における記録例

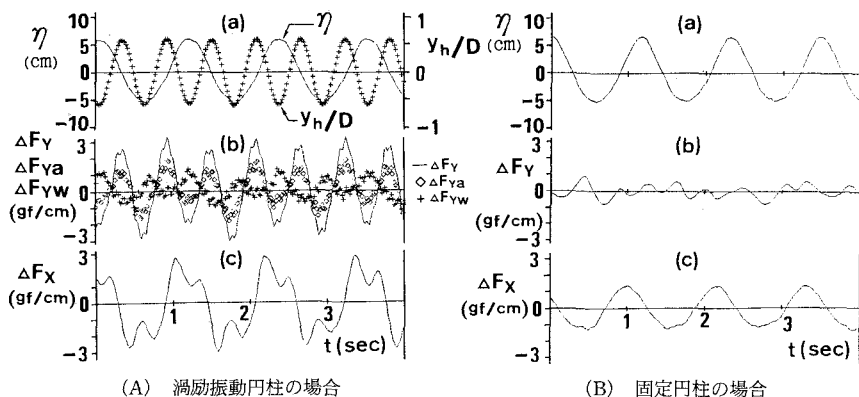


図-3 渦励振動円柱と固定円柱に作用する波力の比較例 ($f_w/f_{nw}=1/2$, $CKC=12$, $LKC=7.7$)

$$d^2 y_h / dt^2 \div -e^{-\beta t} \cdot y_{h0} \cdot p^2 \cdot \cos(p \cdot t) = -p^2 \cdot y_h \quad \dots\dots\dots (2)$$

空中における ΔF_Y の値は、円柱振動時に生じるセグメント円柱の単位長さ当りの慣性力である。静水中における ΔF_Y の値は、上記の慣性力とセグメント円柱の単位長さ当りの水中付加慣性力を合わせたものである。円柱の振動加速度 $d^2 y_h / dt^2$ に比例するこれらの ΔF_Y は、減衰定数が小さい減衰振動においては(2)式の近似が成り立つ結果、振動変位 y_h に比例するものと考えられる。

図-2(a), (b)に示されている ΔF_Y と y_h/D の値を縦軸、横軸に取ったりサーージュの図を図-2(c)にそれぞれ示す。空中および静水中での ΔF_Y は、それぞれ円柱変位 y_h/D にほぼ比例していることが確認できる。空中および静水中におけるこれら慣性力を ΔF_{ia} , ΔF_{iw} とすると、図-2より以下の近似式が得られる。

$$\Delta F_Y(\text{空 中}) = \Delta F_{ia} = 2.37 \cdot y_h/D \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta F_Y(\text{静水中}) = \Delta F_{iw} = 5.17 \cdot y_h/D \quad \dots\dots\dots (4)$$

3.2 渦励振動円柱に作用する波力の評価例

揚力の第2次周波数成分と試験円柱が共振(渦励振動)している場合 ($f_w/f_{nw}=1/2$) のセグメント円柱部に作用する波力の評価例として $CKC=12$ の場合の結果を図-3(A)に示す。この場合のセグメント円柱部での CKC 数 (LKC) は 7.7 である。比較のために、同じ作用波中に試験円柱を固定させた場合の同様な波力の測定結果を図-3(B)に示す。

図-3の(a)は、作用波水位 η および振動変位 y_h/D (振動円柱の場合のみ) の時間変化を示す。図-3の(b)は、2分力計で計測されたY方向(揚力)の波力 ΔF_Y と(3)、(4)式を利用した次式で評価された波力 ΔF_{Ya} , ΔF_{Yw} (渦励振動円柱の場合のみ) の時間変化を示す。

$$\Delta F_{Ya} = \Delta F_Y - \Delta F_{ia} = \Delta F_Y - 2.37 \cdot y_h/D \quad \dots\dots (5)$$

$$\Delta F_{Yw} = \Delta F_Y - \Delta F_{iw} = \Delta F_Y - 5.17 \cdot y_h/D \quad \dots\dots (6)$$

ΔF_{Ya} は振動時のセグメント円柱単位長に作用する正

味のY方向流体力(揚力)と考えられる。 ΔF_{Ya} から水中付加慣性力を取り除いたものである ΔF_{Yw} は、質量項に水中付加質量を含めた場合の振動方程式中の強制外力項に用いられるべき値と考えられる(林ら, 1990b)。振動時の ΔF_{Ya} と ΔF_{Yw} はともに円柱固定時の ΔF_Y より大きくなっていることが認められる。

図-3の(c)は、2分力計で計測されたX方向の波力 ΔF_X の時間変化を示す。試験円柱はY方向にのみ振動する。したがって、 ΔF_X には円柱振動にともなう慣性力の影響は無いものと考えられる。振動時には顕著な ΔF_X の増加が生じるとともに、位相変化の形も円柱固定時とは異なっていることが認められる。

3.3 作用波力の増加特性

試験円柱の静水面位置における渦励振動量 y_h の最大片幅振幅値および実効値を $Y_{h(max)}$, $Y_{h(rms)}$ とする。渦励振動時の ΔF_X , ΔF_{Ya} , ΔF_{Yw} の実効値を ΔVF_X , ΔVF_{Ya} , ΔVF_{Yw} とする。円柱固定時の ΔF_X , ΔF_Y の実効値を ΔRF_X , ΔRF_Y とする。振動時のこれら波力 (ΔVF_X , ΔVF_{Ya} , ΔVF_{Yw}) の増加率 (M_X , M_{Ya} , M_{Yw}) を次式でそれぞれ定義する。

$$M_X = \Delta VF_X / \Delta RF_X \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$M_{Ya} = \Delta VF_{Ya} / \Delta RF_Y \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$M_{Yw} = \Delta VF_{Yw} / \Delta RF_Y \quad \dots\dots\dots (9)$$

試験円柱が作用揚力の第2次周波数成分と共振している実験ケース (CASE V2, $f_w/f_{nw}=1/2$) で得られた、上記各数値の CKC 数に対する変化特性を図-4(a)~(e)に示す。このケースにおける LKC と CKC の関係は $LKC=0.634 \cdot CKC$ である。

円柱振動は $5 < CKC < 12$ の範囲で急増し、その後は緩やかに増加し $CKC=20$ 付近でピークを示すようである。 ΔVF_X と ΔRF_X の差は、円柱振動の増加に伴い大きくなっている。 ΔVF_{Ya} と ΔRF_Y の差は、 $5 < CKC < 17$ の範囲で顕著に認められる。 ΔVF_{Yw} は ΔRF_Y より、 $5 <$

CKC<14の範囲では大きくなるが、14<CKCの範囲では小さくなっている。

増加率 M_x は、CKC=16でゆるいピーク値 ($M_x=2.2$) を示し、13<CKCでは約2となっている。 M_{ya} は5<CKCで急増し、CKC=7.5で大きなピーク値 ($M_{ya}=8.4$) を示す。その後はCKCの増加にともない減少し、CKC=20では M_{ya} =約1となっている。 M_{yw} も M_{ya} と同様な変化をするが、CKC=8~9で生じるピーク値 ($M_{yw}=2.6$) は M_{ya} に比べて小さい。

波動場で渦励振動している直円柱に作用する揚力の増加率 M_Y を評価した既存値を表-2に示す。 $f_w/f_{nw}=1/2$ の場合の既存値 (図中の●印: Isaacson・Mauil (1981), ▼印: Zedan・Rajabji (1981), ■印: Angrilli・Cossalter (1982)) と本実験結果との比較を図-4(e)に示す。評価法の細部や渦励振動支配パラメーターである k_s 値 (= Reduced damping 値) 等の実験条件はそれぞれ異なるが、本実験結果とこれら既存値との一致は概ね良好である。

作用揚力の第3次、4次、6次の周波数成分と円柱がそれぞれ共振している場合 ($f_w/f_{nw}=1/3$, CASE V3, $f_w/f_{nw}=1/4$, CASE V4, $f_w/f_{nw}=1/6$, CASE V6) の振動変位 Y_h/D と増加率 (M_x , M_Y) のCKC数に対する変化特性を、図-5(A), (B), (C)にそれぞれ示す。円柱振動が大きくなるCKCの領域は、共振周波数となる揚力周波数成分が高次になるにしたがい高くなっている。

$f_w/f_{nw}=1/3$ の場合、 M_x は、 Y_h/D が最大となるCKC=20付近でピーク値 ($M_x=1.8$) を示す。 M_{ya} は、CKC=18付近でピーク値 ($M_{ya}=1.5$) を示す。このピーク値は既存値 (■印: Angrilli・Cossalter (1982)) より若干小さい。 M_{yw} はCKC全域で1以下となり、特にCKC=17付近では0.65まで低下している。

$f_w/f_{nw}=1/4$ および $1/6$ の場合は、実験水槽サイズの制約から Y_h/D のピーク値が生じる範囲までCKCを上げることができなかったが、以下のことが認められる。

- (1) M_x は、ほぼ Y_h/D と連動して増加しているが、最大値は1.6以下である。
- (2) M_{ya} は1~1.6の範囲である。 Y_h/D との関係は明

確に認められない。

- (3) M_{yw} は、1以上となる場合が若干生じるが、大半は1以下である。

$M_{yw}<1$ となる現象は、振動方程式中の強制外力項に用いられる作用揚力の実効値の大きさが円柱固定時の作用揚力の実効値より小さくなるという興味深い結果を示している。この現象については、作用揚力時系列に対する周波数解析を行い周波数成分値の増加率を求めた結果

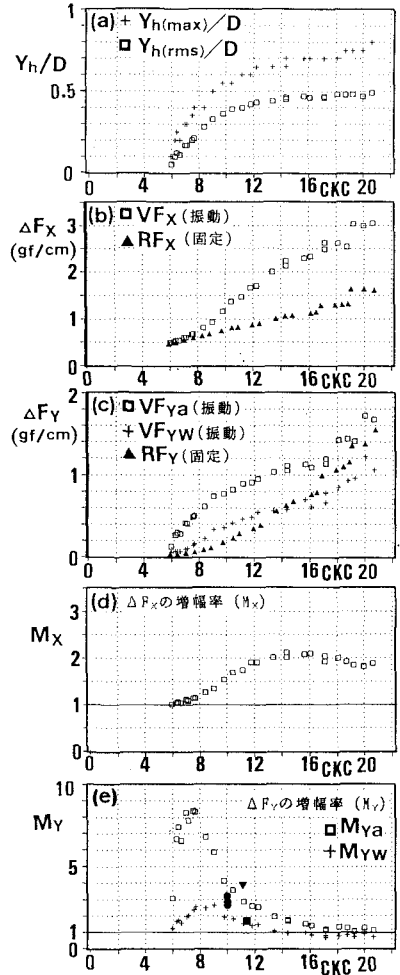


図-4 作用波力およびその増加率とCKC数の関係

表-2 揚力増加率 M_Y の既存値

	$mel(p/D^2)$	k_s 値	f_w/f_{nw}	CKC	k_d	M_Y
1) Isaacson and Mauil (1981)	6.70	3.54	1/2	10.0	1.02	2.85
	6.70	3.54	1/2	10.0	2.08	3.25
	6.70	3.54	1/2	10.0	3.88	2.7
2) Zedan and Rajabi (1981)	22.90	0.83	1/2	11.2	1.63	3.9
3) Angrilli and Cossalter (1982)	5.97	0.98	1/2	11.8	1.53	1.7
	5.97	0.98	1/3	17.8	0.88	1.6
	5.97	0.98	1/4	35.9	0.62	1.9

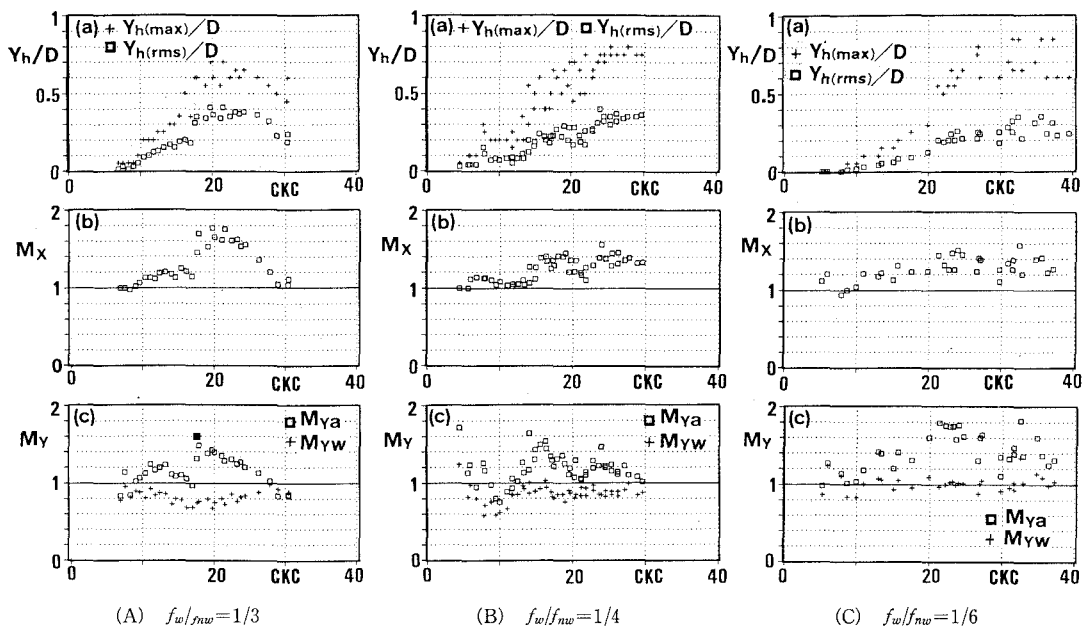


図-5 作用波力の増加率とCKC数の関係

等との比較を行い、より詳細な検討を加える必要がある。

意を表します。

4. 結 言

本報告は、波動場で渦励振動している直円柱に作用する波力は円柱固定時の場合より増加する現象を、波力の直接計測を行い定量評価したものである。限られた実験条件の範囲ではあるが、以下の主要な結果が得られた。

(1) 渦励振動量が大きくなるCKC数の領域は、円柱固有振動数 f_{nw} と作用波周波数 f_w の比 f_w/f_{nw} によって異なるため、渦励振動円柱に作用する波力の増加現象は、周波数比 f_w/f_{nw} とCKC数で規定されていることが分かった。

(2) 波の進行方向に作用する正味波力の増加率 M_x の最大値は、 $f_w/f_{nw}=1/3, 1/4, 1/5, 1/6$ の場合には1.8以下であったが、 $f_w/f_{nw}=1/2$ の場合には2.2であった。

(3) 波の進行方向と直角な方向に作用する正味揚力の増加率 M_{ya} は、 $f_w/f_{nw}=1/3, 1/4, 1/5, 1/6$ の場合には1~1.8の範囲であるが、 $f_w/f_{nw}=1/2$ の場合には1~8の範囲であった。

(4) 評価法の相違や渦励振動支配パラメーターの相違による影響を検討する必要があるが、波動場で渦励振動している直円柱に作用する揚力の増加率に関する既存値と、本実験結果との一致は概ね良好であった。

最後に、本研究を推進するにあたり貴重な御助言を頂いた英国 The City 大学の J. R. Chaplin 教授に心から謝

参 考 文 献

林建二郎, J. R. Chaplin (1985): 波動場で渦励振動している直円柱に作用する揚力評価について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 511-515.

林建二郎, 荻原洋聡, 藤間功司, 重村利率(1990a): 波動場で渦励振動している直円柱の応答振動量評価について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 676-680.

林建二郎, 荻原洋聡, 藤間功司, 重村利率(1990b): 振動流中で渦励振動している円柱と流れの相互作用について, 水工学論文集, 第34巻, pp. 265-270.

林建二郎, 藤間功司, 重村利率, 荻原洋聡 (1993): 振動流中における円柱の渦励振動特性と流れとの相互作用現象, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 841-845.

Angrilli F. and V. Cossalter (1982): Transverse oscillations of a vertical pile in waves, Journal of Fluids Engineering, March Vol. 104, pp. 46-53.

Blevins, R. D. (1977): Flow-induced vibration, Van Nostrand Reinhold 363 p.

Isaacson M. Q. and Mauld D. J. (1981): Dynamic response of vertical piles, International Symposium on Hydrodynamics in Ocean Engineering, The Norwegian Institute of Technology, pp. 239-262.

Sarpkaya, T. and F. Rajabi (1979): Dynamic response of piles to vortex shedding in oscillating flows, Offshore Technology Conference in Houston, pp. 2523-2528.

Zedan, M. F. and F. Rajabi (1981): Lift forces on cylinders undergoing hydroelastic oscillations in waves and two dimensional harmonic flow, International Symposium on Hydrodynamics in Ocean Engineering, The Norwegian Institute of Technology, pp. 239-262.